

基礎杭利用地熱融雪システムにおける熱出力の見積

竹内 正紀* 木村 照夫* 田中 義樹* 宮本 重信**

Thermal Output of Snow-Melting System Using Geothermal Energy Collected by Building Piles

Masanori TAKEUCHI, Teruo KIMURA,
Yosiki TANAKA, and Shigenobu MIYAMOTO

(Received Feb. 26, 1993)

The numerical simulation was made to evaluate the snow-melting system using the geothermal energy collected by building piles. The thermal output from the system and the heat value collected from the pile and its surrounding soils have been obtained for a wide range of following parameters: the outer diameter and the length of pile, the snow-melting area and the velocity of circulating water in the system. The calculations were also made for various combinations of paving materials and a heating pipe. The charts provided in this paper are useful for designing the parameters of snow-melting system.

1. はじめに

凍結のおそれの少ない比較的温暖な積雪地では、冬季の快適環境を得るために、地下水を用いて道路・駐車場などを融雪することが広く行われている。しかし、地下水を用いた方式は降雪時に集中的な揚水ポンプの運転が行われるため、地下水位の低下や地盤低下など環境に悪影響をもたらしている。そこで、筆者らを含めたグループはこのような悪影響が無く、かつ建設・運用コストも安価な環境にやさしい融雪法として、地熱集熱用の熱交換器に建物などの基礎杭をそのまま利用した地熱を熱源とする融雪システムを開発し、その有効性を確かめると共に、数値シミュレーションによる熱量が実験結果とよく合うことを確かめた^{1), 2), 3)}。ところで、基礎杭は建物が建設される場所の地盤と建物の大きさにより、その寸法と配置が決定されるため、熱交換器として基礎杭を利用する際には、与えられた条件の基礎杭からどれだけの熱量を取り出せるかをあらかじめ知ることが融雪可能な面積の決定や熱交換器として利用する杭の数と配置を決めるために必要となる。そのた

めに、杭から取り出せる熱量をあらかじめ数値シミュレーションにより求めておくことは実用上有用である。本報告は基礎杭によく使われるコンクリート杭について、杭からの取り出し熱量と杭内の水が杭とその周囲の土から回収する熱量を数値シミュレーションにより計算したものである。

2. 主な記号

以下に、本報告で用いた主な記号を示す。

- A : 融雪面積
- D_o : 杭の外径
- K_u : 放熱管内の水と舗装面上の雪との間の熱通過率
- K_d : 放熱管内の水と舗装体下方の路盤との間の熱通過率
- L : 杭の長さ（集熱有効長さ）
- Q_P : 杭1本よりの取り出し熱量の積算値
- \dot{Q}_P : 杭1本より単位時間に取り出す熱量
- Q_R : 杭1本で杭内の水が杭とその周囲の土から集める熱量の積算値
- \dot{Q}_R : 杭1本で杭内の水が杭とその周囲の土から単位時間集める熱量
- r : 杭の中心から半径方向の距離
- t : 融雪開始後の経過時間
- T : 温度
- T_w : 杭内の水の温度
- U_w : 杭内の水の流動速度
- V_w : 放熱管内の水の流動速度
- z : 杭の底より上方向の距離

3. 計算モデル

本融雪システムは、図1にその概略を示すように、路面や駐車場などの舗装体内に埋め込んだ放熱管と水などの熱媒体を内部に溜めた基礎杭を保温した管路でつなぎ、管路の途中に熱媒体の循環のためのポンプを設置したものである。ポンプは舗装面上の積雪の有無を感知する積雪センサーの信号と放熱管の凍結防止信号により自動運転される。ポンプが運転されると、基礎杭上方の温かい熱媒体が放熱管に送られ、舗装面上の雪を溶かすことによって冷えた熱媒体は基礎杭下方に戻される。基礎杭内では熱媒体が高さ方向に温度成層を保ちながら上方に流れ

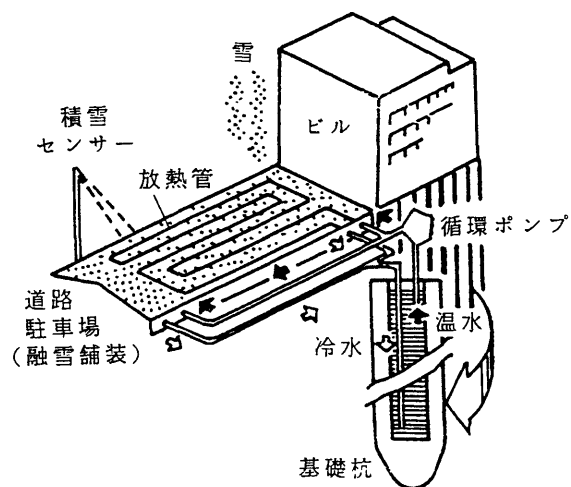


図1 融雪システム

る間に基礎杭およびその周囲の土が保有する熱を集める^{1), 2), 3)}。

本システムの1本の杭から取り出せる熱量と杭および周囲の土からの集熱する熱量を数値シミュレーションするために、熱媒体として水を用い、コンクリート杭、杭の外側の土、コンクリート杭内の水について、図1に示す座標系を用いて数値計算した。本システムでは、杭の下端に流入する水の温度は杭の上端から出る水の温度と融雪のための放熱量の大きさによって時間的に変化する。したがって、非定常な温度変化をシミュレーションするには、融雪面である舗装体と放熱管内の水の非定常な温度変化を計算し、放熱管出口の水の温度すなわち杭の下端に流入する水の温度を求める必要がある。放熱管内の水と舗装の温度分布を三次元非定常計算するのは余りにも複雑であるので、本シミュレーションでは放熱管に熱交換器の考え方を適用して、一次元非定常で近似計算した。なお、杭と放熱管をつなぐ管路の温度降下は無視した。

数値計算の方法は前報^{2), 3)}と同じであるので、以下に要点のみを記述する。熱移動に関する基礎式には次式を用い、差分法で数値計算した。

コンクリート杭および土に関して

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

コンクリート杭内の水に関して

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{h P_w}{\rho_w c_w A_w} (T_1 - T_w) \quad (2)$$

融雪面となる舗装体に配管された放熱管内の水に関して

$$(1+\alpha) \frac{\partial T_w}{\partial t} = -V_w \frac{\partial T_w}{\partial x} - \frac{K_u B}{c_w \rho_w} (T_w - T_s) - \frac{K_d B}{c_w \rho_w} (T_w - T_d) \quad (3)$$

杭内の水と杭内壁との間の熱伝達率 h に関して⁴⁾

$$\left(\frac{h D_i}{\lambda_w} \right)^3 = (3.657)^3 + \left(\frac{0.75 (Ra D_i / L_i)^{1/4}}{\{1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\}^{4/9}} \right)^3 \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 T はコンクリート杭あるいは土の温度、 T_w は杭内あるいは放熱管内の水の温度、 T_1 は杭内壁の表面温度、 T_s 、 T_d はそれぞれ舗装面上の雪、舗装体下方の路盤の土の温度である。 U_w 、 V_w はそれぞれ杭内および放熱管内の水の速度である。 x は管入口から管に沿って測った距離、 α は舗装のもつ熱容量を放熱管内の水の熱容量に置き換えた場合の割合を示している。 B は放熱管の配管ピッチ、 P_w 、 A_w は杭の内径の周囲長さと断面積、 K_u 、 K_d はそれぞれ放熱管内の水と雪、放熱管内の水と舗装体下方の路盤の間の熱通過率である。また、 λ_w 、 ρ_w 、 c_w 、 Pr はそれぞれ水の熱伝導率、密度、比熱、プラントル数である。また、 D_i は杭の内径、 L_i は杭内で自然対流が生じる領域の長さ

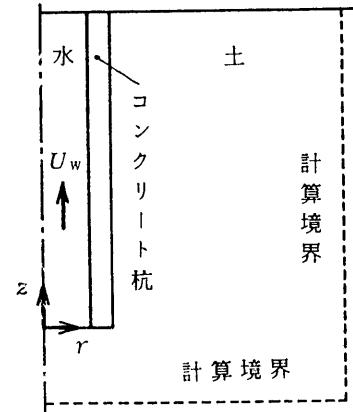


図2 杭の断面図と座標系

であり、 Ra はレーレー数ある。数値計算では、時間に関して、コンクリート杭および土の温度は陽解法で、杭内および放熱管内の水の温度は陰解法で計算した。また、空間の差分近似は3点中心差分を用い、杭から離れるにしたがって計算格子が粗くなる不等間隔格子を用いた。

計算の対象としたコンクリート杭の外径寸法 D_o は日本工業規格(JIS A5337)に従い、杭の厚さは通常製作時に規格の値より約10mm程厚くなることを考慮して表1に示すように定めた。有効に地熱を集熱できる杭の長さ L は福井市およびその近郊の地層を対象に20, 30, 40mとした。また、融雪面積 A は10, 20, 30 m^2 の3種類とし、20, 30 m^2 の場合には10 m^2 毎に放熱管が並列に配管され、かつそれぞれの放熱管内の水の速度は同じ値とした。したがって、20, 30 m^2 の面積を融雪するときの杭内の水の速度はそれぞれ10 m^2 の面積を

融雪するときの杭内の水の速度の2, 3倍になる。計算の際には、

杭が適当なピッチで打設されることを考え、杭の水平遠方の計算境界(杭が集熱する範囲)を杭の中心より1.8m, 杭の下方計算境界を杭の底より5mとし、それらの計算境界と杭の上端に対応する水平面で断熱に保たれるとした。また、福井における地温の実測値¹⁾を参考に、杭, 土, および杭内の水が15.8 $^{\circ}C$ で一様温度に保たれた状態から計算を始め、連続的に72時間融雪を続けるものとして、その際の杭からの取り出せる熱量と杭内の水が杭とその周囲の土から集熱する熱量を計算した。計算に用いた定数を表1に示す。

表1 計算に用いた定数

コンクリート杭： 外径 D_o x 厚さ		350x65, 400x70, 450x75, 500x87.5, 600x100, 700x110, 800x120 mm
熱伝導率	λ	1.83 W/($m \cdot K$)
比熱	c	0.9 kJ/($kg \cdot K$)
密度	ρ	2400 kg/m^3
土：		
熱伝導率	λ	1.54 W/($m \cdot K$)
比熱	c	1.9 kJ/($kg \cdot K$)
密度	ρ	1730 kg/m^3
水：		
熱伝導率	λ_w	0.58 W/($m \cdot K$)
比熱	c_w	4.2 kJ/($kg \cdot K$)
密度	ρ_w	1000 kg/m^3
一定に保たれる温度：		
雪	T_s	0 $^{\circ}C$
舗装体の下方路盤	T_d	5 $^{\circ}C$
初期温度： コンクリート杭, 土, 杭内の水		15.8 $^{\circ}C$
熱通過率(厚さ100mmのコンクリート舗装, かぶり30mm, 内径x外径13x17mmのポリエチレン放熱管の場合)		
放熱管と雪の間	K_u	23.7 W/($m^2 \cdot K$)
放熱管と舗装体下方の路盤の間	K_d	7.1 W/($m^2 \cdot K$)
舗装体と放熱管の熱伝導率		
コンクリート		1.4 W/($m \cdot K$)
アスファルト		2.8 W/($m \cdot K$)
ポリエチレン管		0.34 W/($m \cdot K$)
鋼管		43.0 W/($m \cdot K$)

4. 数値シミュレーション結果

4. 1 杭の長さや融雪面積の影響

打ち込み杭としてよく使われる外径450 mm、厚さ75 mmの杭と、埋め込み杭としてよく使われる外径の700 mm、厚さ110 mmの杭について、杭の長さ L を20、30、40 m、融雪面積 A を10、20、30 m^2 に変化させた場合に、融雪開始から6、12、24、48、72時間後に融雪面積1 m^2 当たりに杭から取り出せる積算熱量 Q_P/A と杭内の水が杭とその周囲の土から集熱する熱量の積算値 Q_R/A およびそれらの時間勾配値 \dot{Q}_P/A 、 \dot{Q}_R/A を図3～10に示す。なお、これらの図の融雪面の構造は厚さ100 mm（放熱管のかぶり30 mm）のコンクリート舗装であり、放熱管は内径13 mm、外径17 mmのポリエチレン管（管内の水の速度0.6 m/s）である。図から、これらの杭について、任意の長さの杭に対する熱量が読み取れる。杭内の水が一巡するまでの時間は杭の長さが長いほど長くなるが、その間の取り出し積算熱量と単位時間あたりの取り出し熱量は杭の長さに関わらず一定になり、その値は最初に杭内に保有する水の温度で定まる。杭内の水が一巡した後の熱量は杭の長さが長いほど、また融雪面積が小さいほど大きくなる。なお、本融雪システムの実験¹⁾によると降雪深1 cm当たり0.39 MJ/ m^2 の熱量が融雪に必要であるので、この値で取り出し熱量を割ると、融雪可能な累積降雪深の大きさがわかる。たとえば、外径×厚さ450×75 mm、長さ30 mの杭で20 m^2 の融雪面積の融雪を行うと、72時間で取り出し熱量は33.3 MJ/ m^2 となり、これは85 cmの降雪深を融雪出来る熱量に相当することになる。

4. 2 杭の直径の影響

前節で示した杭の直径と異なる杭を用いた場合に、熱量がどのように変化するかを知るために、杭の長さを30 m、融雪面積を20 m^2 に固定し、コンクリート杭の外径 D_o を変化させた場合に、融雪開始から6、12、24、48、72時間後に融雪面積1 m^2 当たりに杭から取り出せる積算熱量 Q_P/A と杭内の水が杭とその周囲の土から集熱する熱量の積算値 Q_R/A およびそれらの時間勾配値 \dot{Q}_P/A 、 \dot{Q}_R/A を図11(a)～(d)に示す。なお、杭の外径が変化すると、杭の厚さも表1に示すように変化している。また、これらの図の融雪面の構造は厚さ100 mm（放熱管のかぶり30 mm）のコンクリート舗装であり、放熱管は内径13 mm、外径17 mmのポリエチレン管（管内の水の速度0.6 m/s）である。図より、杭内の水が一巡するまでの時間は杭の外径（内径）が大きくなるほど長くなるが、その間の単位時間あたりの取り出し熱量は杭の外径（内径）に関わらず一定である。杭内の水が一巡した後の取り出し熱量は杭の外径（内径）にほぼ比例して大きくなるのがわかる。また、杭内の水が一巡するまでは、単位時間あたりの回収熱量は杭の直径が大きいほど小さくなるが、杭内の水が一巡した後の単位時間あたりの回収熱量は杭の外径にほぼ比例することがわかる。

4. 3 循環水の流量の影響

循環水の流量が変化した場合に熱量がどのように変化するかを調べるために、杭の寸法を外径×厚さ450×75 mm、長さ30 mに、融雪面積を20 m^2 に固定し、放熱管として内径13 mm、外径17 mmのポリエチレン管を用いた厚さ100 mmのコンクリート舗装（放熱管のかぶり30 mm）の放熱管内の流速を0.4から1.2 m/sに変化させた場合の融雪面積1 m^2 当たりに杭から取り出

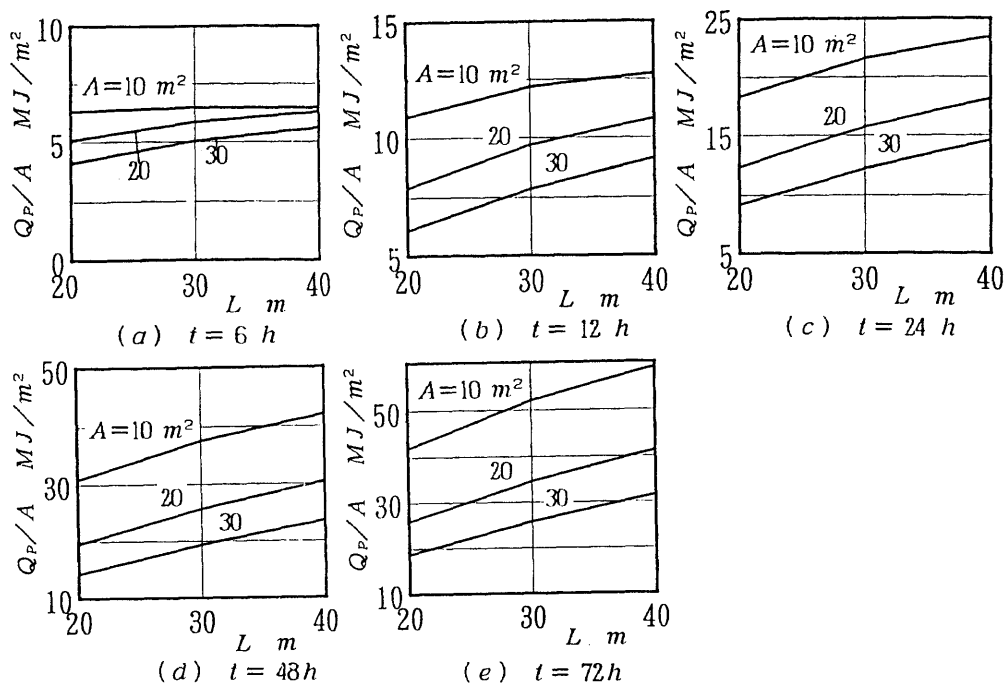


図3 積算取り出し熱量 (杭の外径450 mm, 厚さ75 mm,
舗装体は厚さ100 mm のコンクリート+ポリエチレン管)

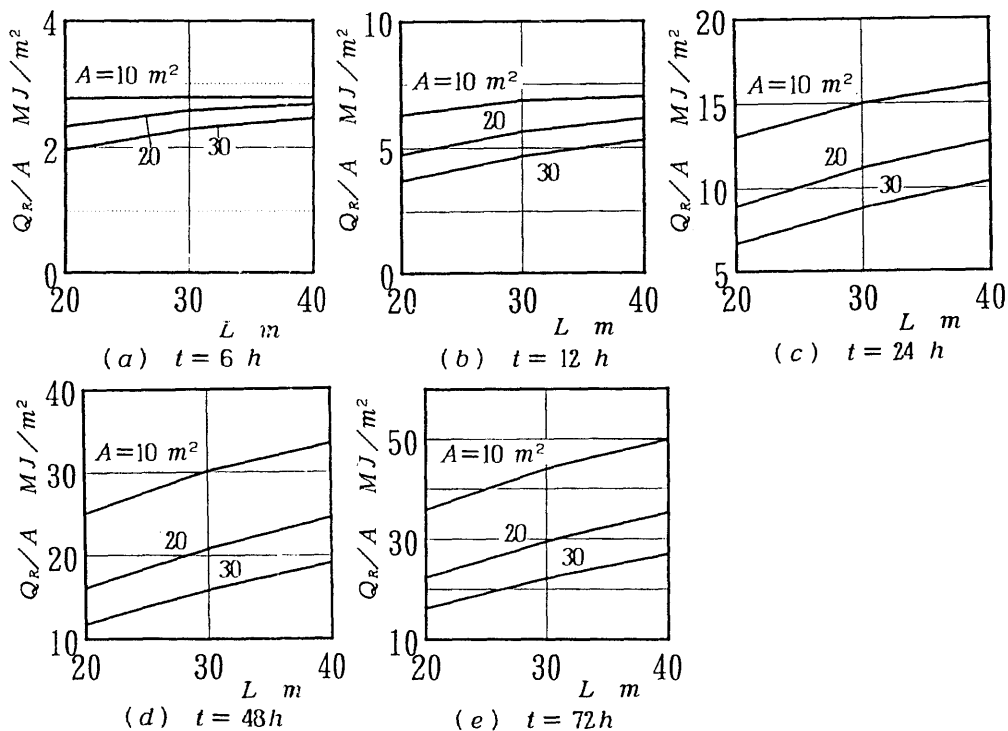


図4 積算集熱量 (杭の外径450 mm, 厚さ75 mm,
舗装体は厚さ100 mm のコンクリート+ポリエチレン管)

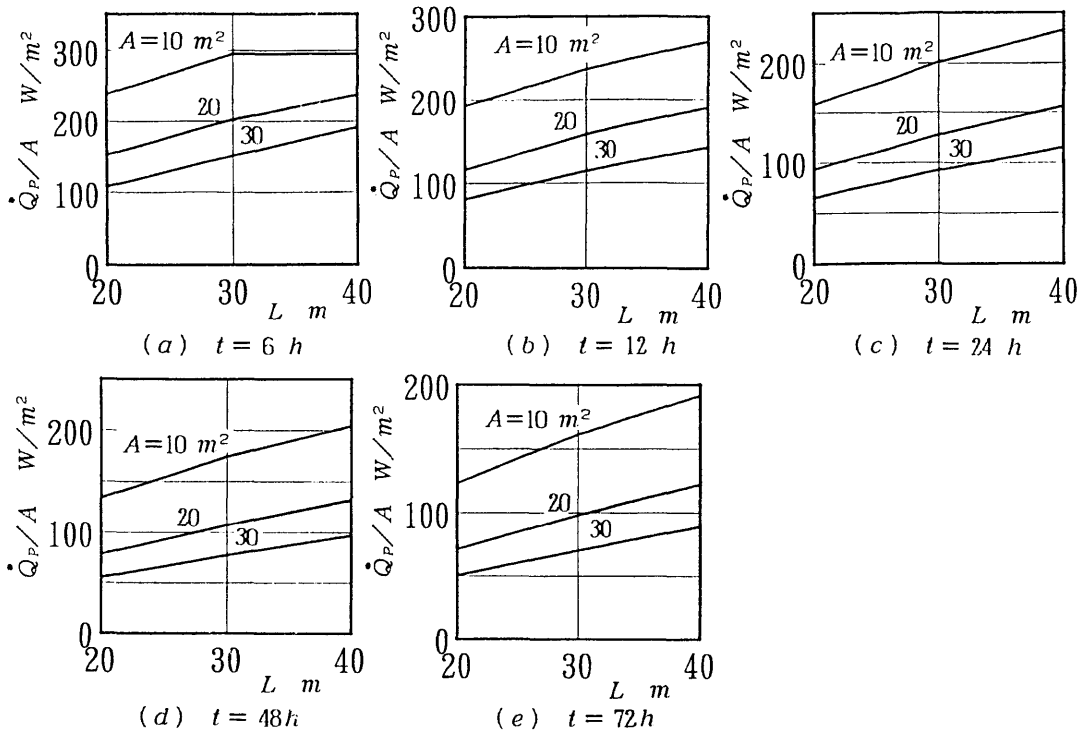


図5 単位時間あたりの取り出し熱量（杭の外径450 mm，厚さ75 mm，
舗装体は厚さ100 mmのコンクリート+ポリエチレン管）

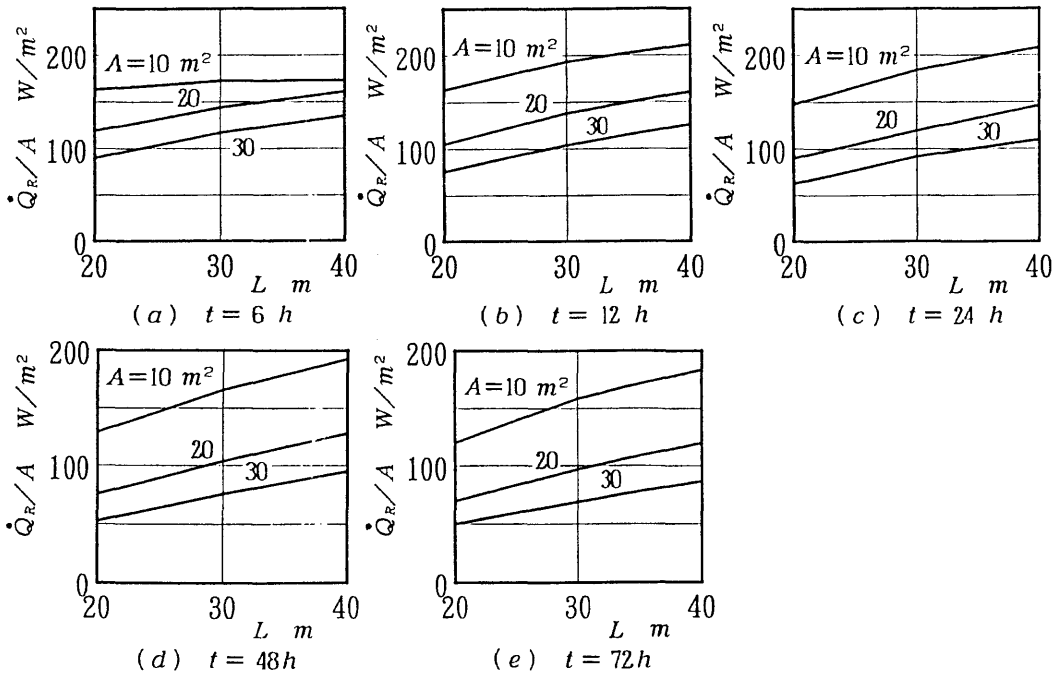


図6 単位時間あたりの集熱量（杭の外径450 mm，厚さ75 mm，
舗装体は厚さ100 mmのコンクリート+ポリエチレン管）

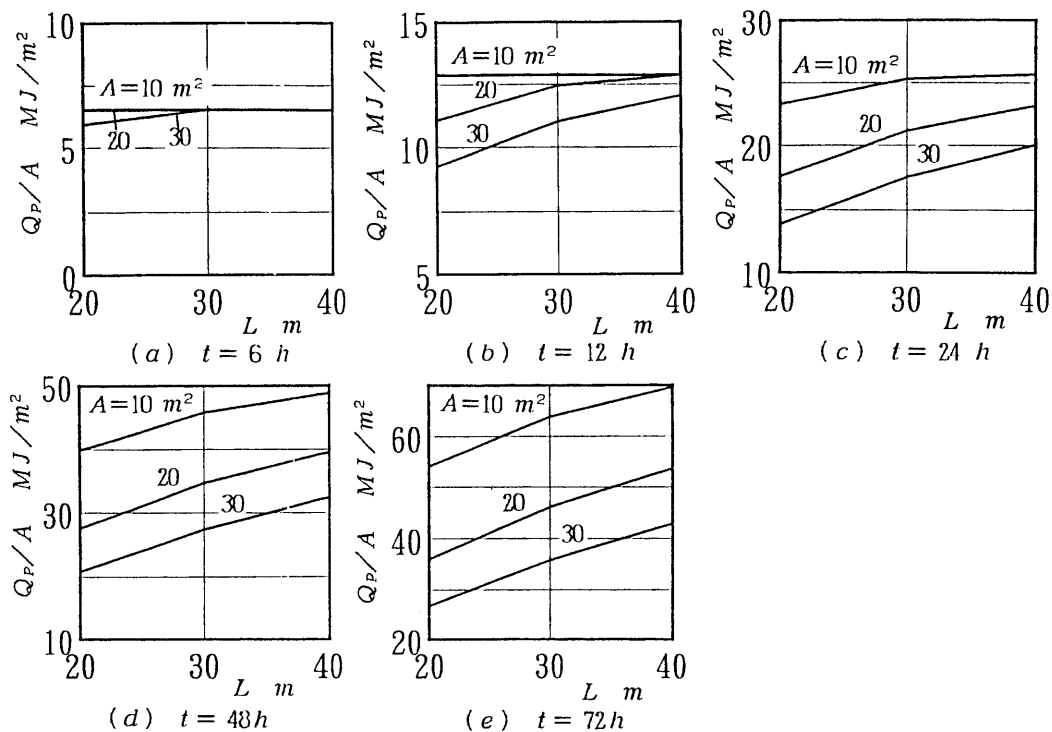


図7 積算取り出し熱量 (杭の外径700 mm, 厚さ110 mm,
舗装体は厚さ100 mm のコンクリート+ポリエチレン管)

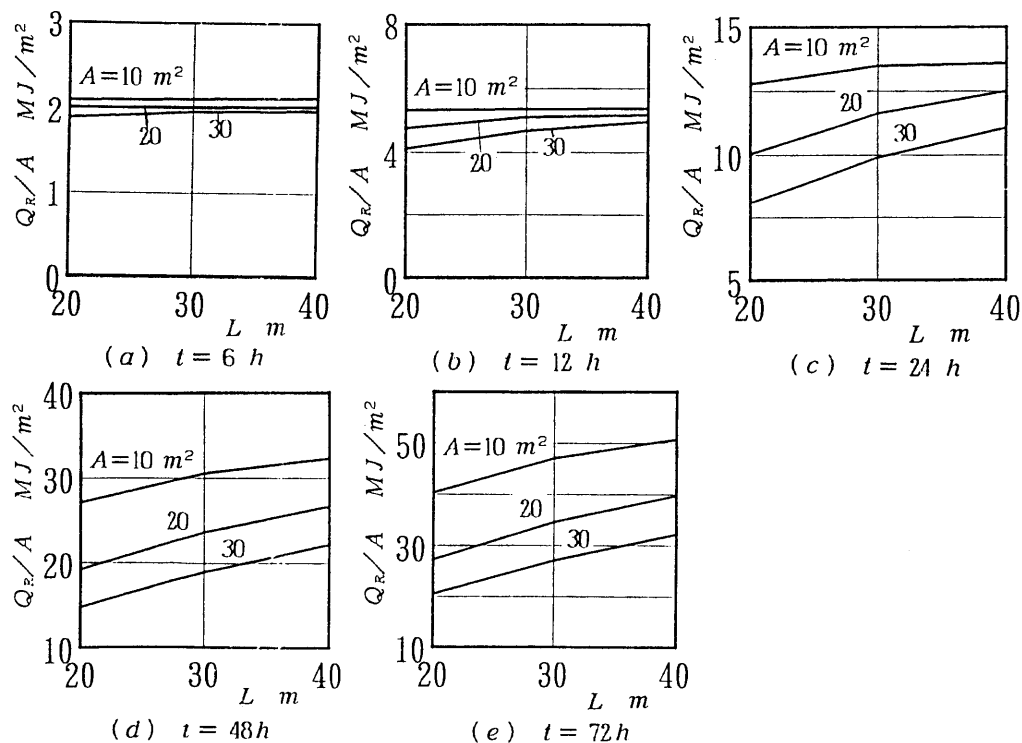


図8 積算集熱量 (杭の外径700 mm, 厚さ110 mm,
舗装体は厚さ100 mm のコンクリート+ポリエチレン管)

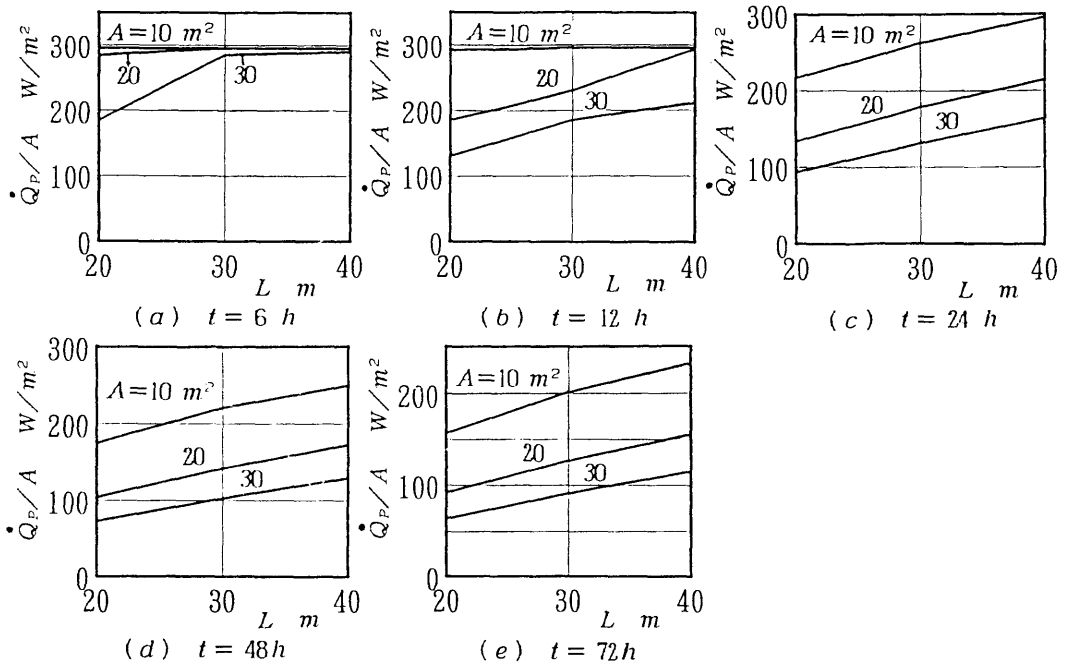


図9 単位時間あたりの取り出し熱量（杭の外径700mm，厚さ110mm，
舗装体は厚さ100mmのコンクリート+ポリエチレン管）

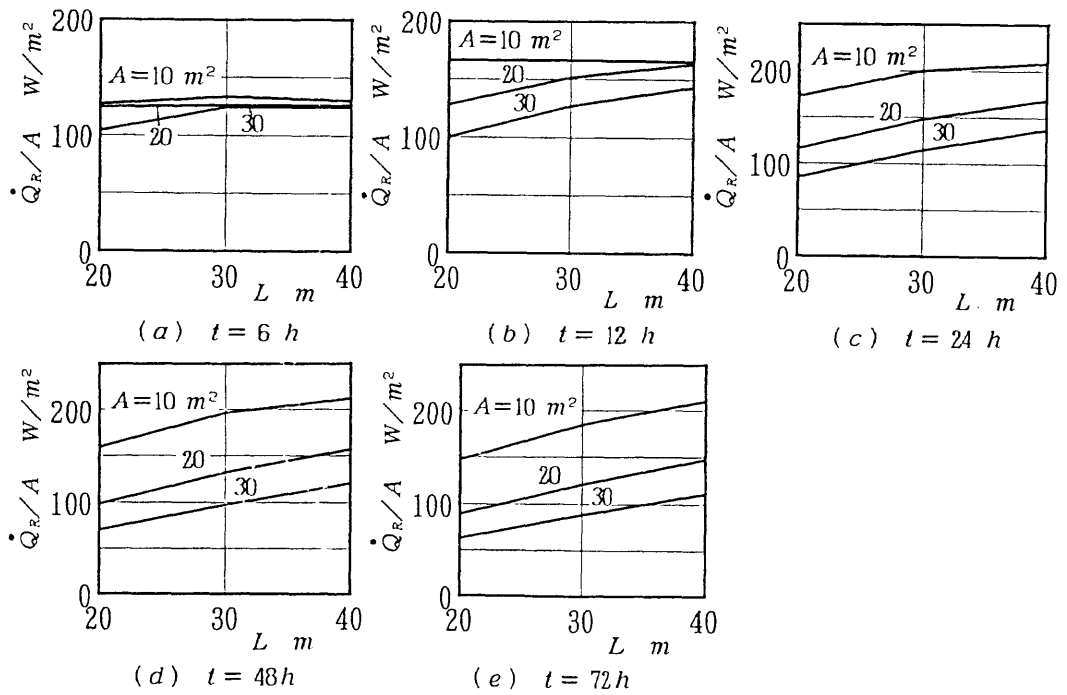


図10 単位時間あたりの集熱量（杭の外径700mm，厚さ110mm，
舗装体は厚さ100mmのコンクリート+ポリエチレン管）

せる積算熱量 Q_P/A と杭内の水が杭とその周囲の土から集熱する熱量の積算値 Q_R/A およびそれらの時間勾配値 \dot{Q}_P/A , \dot{Q}_R/A を図12(a)~(d)に示す。なお、放熱管内の水の流量と杭内の水の流量は等しいので、放熱管内の水の流速の変化は循環水の流量の変化に対応している。図のように循環水の流量が大きくなっても熱量はごくわずかしき大きくなりません。すなわち、熱量は循環水の流量に非常に鈍感である。

4. 4 舗装体の構造の影響

舗装体の構造が熱量にどのような影響を及ぼすかを知るために、放熱管としてポリエチレン管（内径13mm、外径17mm）と鋼管（内径12.7mm、外径17.3mm）、舗装材としてコンクリートとアスファルト、舗装の厚さとして100mm（放熱管のかぶり30mm）と120mm（放熱管のかぶり50mm）を想定し、これらの組み合わせによって、融雪面積1 m² 当りに杭から取り出せる積算熱量 Q_P/A と杭内の水が杭とその周囲の土から集熱する熱量の積算値 Q_R/A およびそれらの時間勾配値 \dot{Q}_P/A , \dot{Q}_R/A がどのように変化するかを図13(a)~(d)に示す。なお、これらの図で杭の寸法は

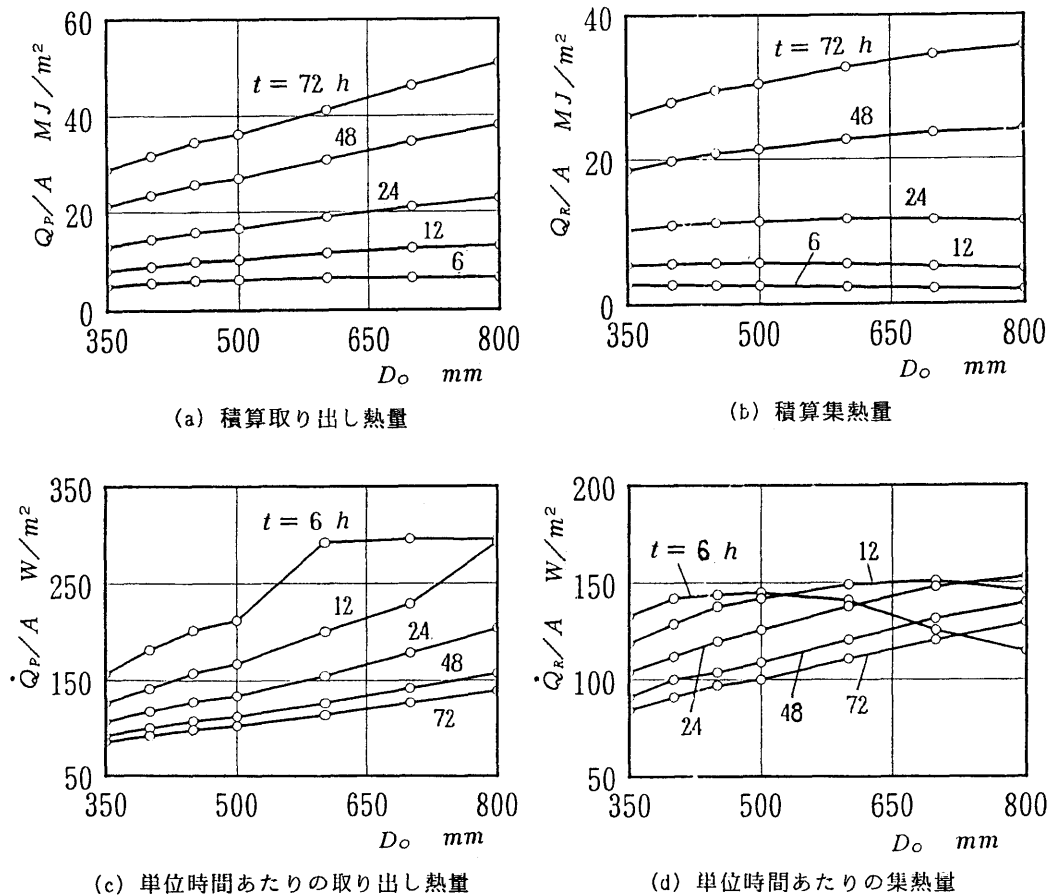


図11 杭の直径の影響（杭の長さ30m、融雪面積20m²、舗装体は厚さ100mmのコンクリート+ポリエチレン管）

外径×厚さ 450×75 mm, 長さ 30 m に, 融雪面積は 20 m^2 に固定してある. また, 本計算の方法では舗装体の構造は放熱管内の水と舗装面上の雪の間の熱通過率 K_u の大ききで評価されるので図13の横軸にはこの熱通過率 K_u がとってある. 図のように熱通過率の大きい構造にすると, 熱量は若干大きくなるのがわかる.

5. おわりに

基礎杭利用地熱融雪システムを実際に採用する場合に必要な杭からの取り出し熱量と杭内の水が杭と周囲の土から集める熱量の予測値を計算した. 杭の直径と長さを大きくすればそれらの熱量は大きくなる. また, 舗装体の構造を熱通過率の大きいものにすると, 熱量は若干増加するが, 循環水の流量は熱量にはほとんど影響しないことがわかった. なお, 本報告に掲載した図表を組み合わせれば, 実際に本システムを設計するにあたって, 熱量の概略値を知ることができる.

参考文献

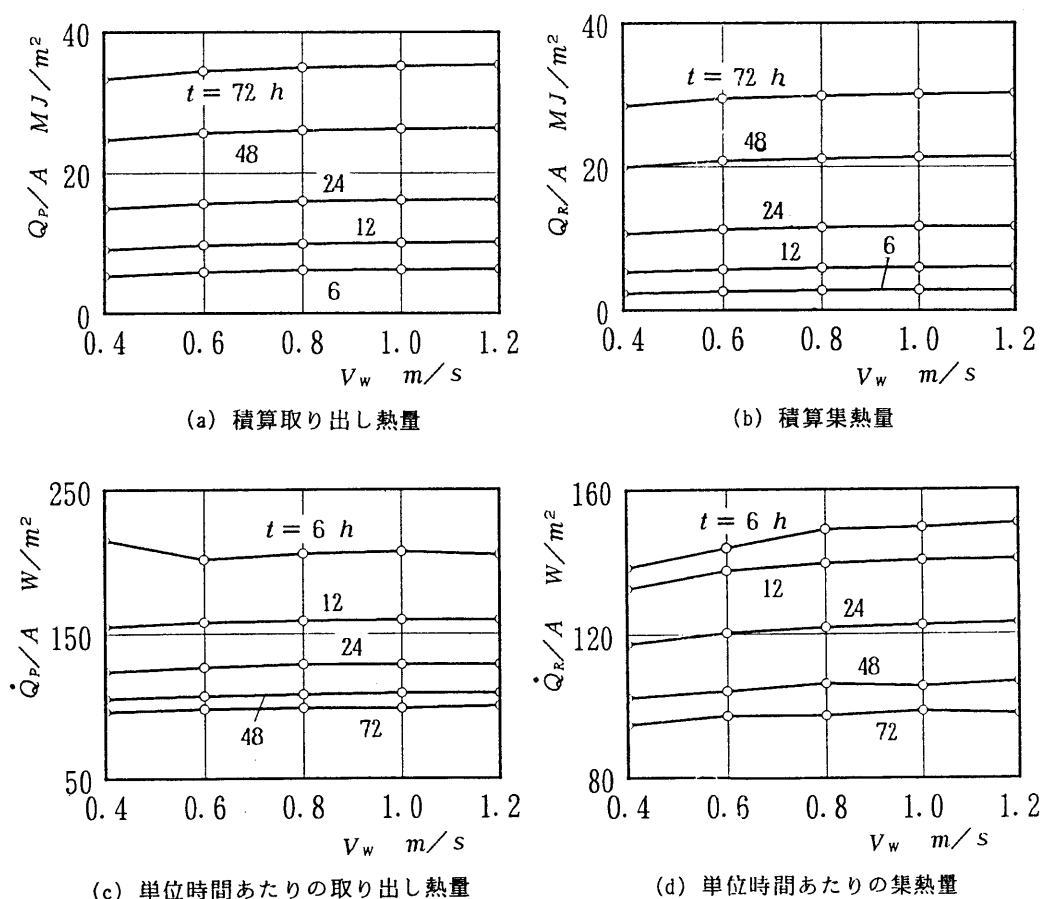
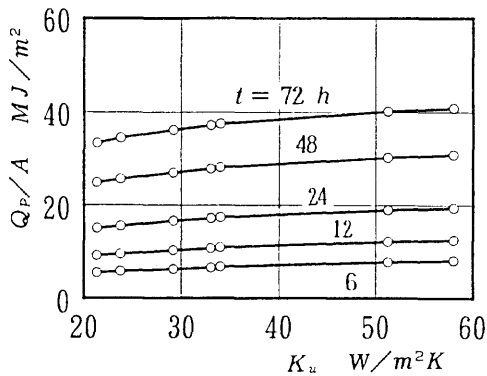


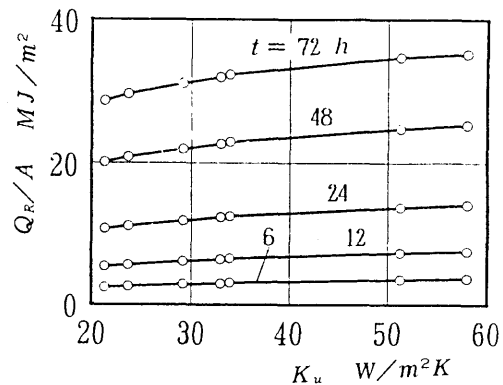
図12 循環水の流量の影響

(杭の外径 450 mm, 厚さ 75 mm, 杭の長さ 30 m, 融雪面積 20 m^2 ,
舗装体は厚さ 100 mm のコンクリート+ポリエチレン管)

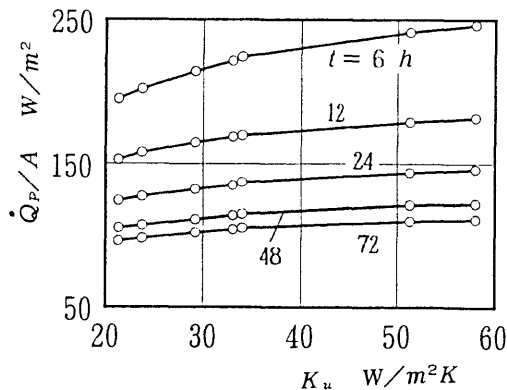
- 1) 宮本・千田・竹内・木村・橋詰・青木・高橋・小林, 基礎杭利用地熱融雪法の開発, 福井県建設・雪対策技術センター年報, 4, 39 (1991) .
- 2) 竹内・木村・坪田・宮本, 基礎杭利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 785 (1992) .
- 3) 竹内・木村・坪田・宮本, 基礎杭利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, 52, 印刷中 (1993) .
- 4) S.W.Churchill, Combined free and forced convection in channels, Heat Exchange Design Handbook, Hemisphere, 2.5.10-1 (1983) .



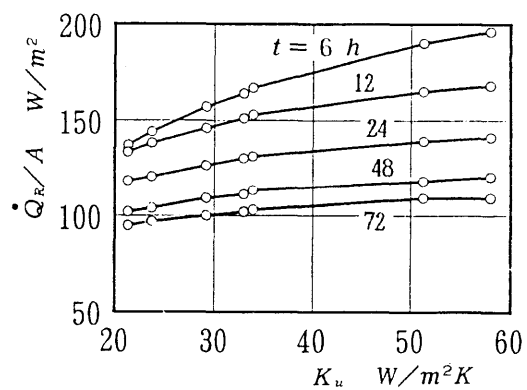
(a) 積算取り出し熱量



(b) 積算集熱量



(c) 単位時間あたりの取り出し熱量



(d) 単位時間あたりの集熱量

図13 舗装体の構造の影響

(杭の外径450 mm, 厚さ75 mm, 杭の長さ30 m, 融雪面積20 m²)

厚さ 120 mm のコンクリート舗装+ポリエチレン管	$K_u = 21.3, K_d = 7.1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
厚さ 100 mm のコンクリート舗装+ポリエチレン管	$K_u = 23.7, K_d = 7.1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
厚さ 120 mm のコンクリート舗装+鋼管	$K_u = 29.2, K_d = 7.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
厚さ 100 mm のコンクリート舗装+鋼管	$K_u = 33.0, K_d = 7.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
厚さ 100 mm のアスファルト舗装+ポリエチレン管	$K_u = 34.0, K_d = 7.1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
厚さ 120 mm のアスファルト舗装+鋼管	$K_u = 51.3, K_d = 7.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
厚さ 100 mm のアスファルト舗装+鋼管	$K_u = 58.0, K_d = 7.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$